

## 運動時の水分摂取が体液調節と血液流動性,体温調節反応に及ぼす影響

### The effect of water intake at the exercise on body fluid regulation, blood fluidity and thermoregulation.

齋 藤 初 恵\*, 藤 田 佳 代\*, 伊 藤 拳\*, 渡 辺 剛\*

Hatsue SAITO \*, Kayo FUJITA \*  
Susumu ITO \* and Tsuyoshi WATANABE \*

#### I はじめに

体内では水が体重の約60%を占めており(体液)、そのうち20%は血漿や間質液などの細胞外液、40%は細胞内液である。生体を正常に機能させるためには体液の恒常性を保たなければならず、それは運動時においても同様である。運動時の発汗(脱水)により体液が失われ、またその浸透圧や電解質のバランスが崩れると、運動能力が低下するばかりでなく運動の継続が困難となり、生命が危険にさらされる場合もある。さらに、運動時には活動筋の代謝量の増加によって熱産生が高まり、体温が上昇する<sup>12) 17)</sup>。その際、体温調節反応として皮膚血流量の増加や発汗が起こり、体熱を放散させることで体温が調節されるが、皮膚血流量の増加は、皮膚以外の循環血液量の減少や静脈還流量の減少を引き起こす。特に運動時は活動筋への血流量が増加するため、皮膚血流量の増加に加えて活動筋への血流配分が要求され、循環器系への負担が大きくなる。このように、運動時には体液の量やその組成を維持することがますます重要となるが、生体にはその変化を最小限にとどめる調節機構(浸透圧調節系、容量調節系)がそなわっている。また運動時に水分摂取を行うこ

とにより体液の量や質を回復させて体温の上昇を抑えることができるため、水分の摂取は運動遂行に有利に作用すると言われている<sup>11) 15) 16)</sup>。

一方、近年、血液流動性の評価に対する関心が高まっている。血液の流動性は循環機能を反映すると考えられており、持久的な運動トレーニングの継続が血流に影響を与えることが報告されている<sup>2) 9) 10) 18)</sup>。運動時の体液調節は、体温調節や循環調節と密接に関わって機能しているが、運動時における体液調節と血液流動性との関わりについては未だ明らかにはされていない。本研究では運動時の水分摂取の有無が体液、特に血漿の成分や量および血液流動性の変化に及ぼす影響と、その結果として体温調節に見られる変化について検討することを目的とした。

#### II 方法

##### 1. 被験者

被験者は健康な成人男子とし、水分摂取群(以下D群)4名(年齢 $24.3 \pm 2.2$ 歳、身長 $175.8 \pm 3.8$ cm、体重 $73.1 \pm 9.4$ kg)、非水分摂取群(以下N-D群)4名(年齢 $25.8 \pm 2.5$ 歳、身長 $177.3 \pm 5.5$ cm、体重 $68.6 \pm 6.0$ kg)とした。実験に先立ち、被験者

\* 国士舘大学大学院スポーツ・システム研究科 (Graduate School of Sport System, Kokushikan University)

には本研究の目的および危険性についての十分な説明を行い、実験参加への同意を得た。

## 2. 実験プロトコール (図-1)

### (1) 運動時の環境条件

運動は温度・湿度を一定にした人工気象室内で行った。人工気象室内の環境条件はWBGT  $19.2 \pm 1.3^{\circ}\text{C}$ 、室温  $23.0 \pm 1.6^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度  $50.2 \pm 9.0\%$ であった。

### (2) 摂取飲料

摂取飲料は市販のミネラルウォーターとした。水分摂取量と水温、摂取タイミングは、日本体育協会による「スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック」<sup>6)</sup>を参考に設定し、D群では運動開始20分前に400ml、運動開始20分後、40分後、60分後に各200ml、計1000mlの水分摂取とした。N-D群では運動開始20分前に400mlの水分を摂取した。ミネラルウォーターの温度はいずれも5～15℃とした。なお、運動開始20分前の水分摂取は、被験者の体内水分状態を標準化する目的で行った。

### (3) 運動負荷

20分間の座位安静を保った後、人工気象室に入室し、運動負荷として自転車ペダリング運動を行った。運動は30% $\dot{V}O_{2\text{max}}$ の負荷で3分間のウォーミングアップを行い、その後50% $\dot{V}O_{2\text{max}}$ で57分間、計60分間行った。ペダリングの回転速度は60rpmとした。運動終了後には人工気象室から退室し、再び20分間の座位安静を保った。

### (4) 測定項目および測定方法

測定項目は体温、心拍数、体重、全血通過時間、ヘマトクリット (以下Hct)、血清総タンパク質、血清浸透圧、血漿バソプレシン (抗利尿ホルモン)、血中乳酸濃度、血中ナトリウム濃度 (以下Na+)とした。

体温、心拍数は安静開始から運動終了20分後まで5分ごとに記録した。体温は耳式体温計 (OMRON MC-150) を用いて測定した。体重測定は安静開始前、運動終了後、運動終了20分後に行った。本研究の運動負荷による体重減少は、ほぼ発汗によるものと考えられることから、安静開始前、運動終了後、運動終了20分後の体重と水分摂取量より、以下に示す式で発汗量を算出した。

$$\text{発汗量} = (\text{安静開始前体重} + \text{水分摂取量}) -$$

運動終了後または運動終了20分後体重  
採血は安静開始20分後 (以下 安静時)、運動終了後、運動終了20分後に行った。全血通過時間の測定はKikuchiらの方法<sup>1)</sup>によって行い、採血後ただちにヘパリンナトリウム濃度が5%になるように全血を調整し、MC-FAN KH-3 (日立原町電子工業社製) を用いて、マイクロチャンネルアレイ Bloody 6-7 (同社製、流路深4.5 $\mu\text{m}$ 、流路幅7 $\mu\text{m}$ 、流路長30 $\mu\text{m}$ の溝が8736本並列配置されているシリコン単結晶基板) を毛細血管モデルとし、全血液100 $\mu\text{l}$ がこの毛細血管モデルを通過する時間を測定した。各全血試料測定の直前に測定した生理食塩水100 $\mu\text{l}$ のマイクロチャンネルアレイ通過時間か

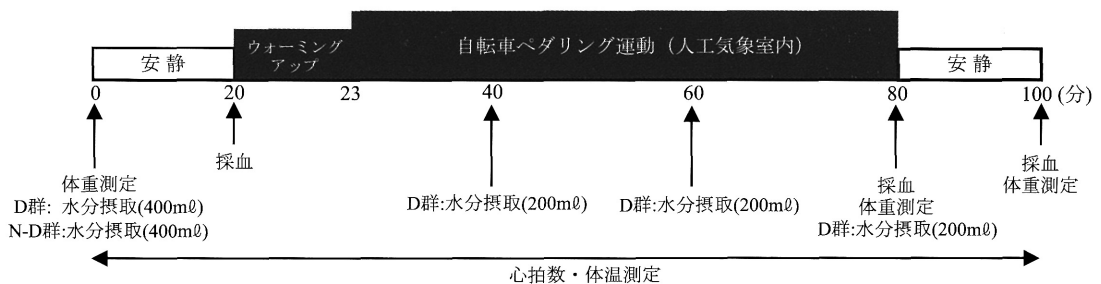


図-1 実験プロトコール

ら、次式によって全血通過時間を算出した。

$$\text{全血通過時間(秒)} = \frac{\text{血液通過時間} \times 12 \text{秒}}{\text{生理食塩水通過時間}}$$

Hct、血清総タンパク質、血清浸透圧、血漿バソプレシン、血中乳酸濃度、 $\text{Na}^+$ については、(株)三菱化学BCLに委託分析した。

#### (5) 統計処理

統計量は全て平均値 $\pm$ 標準偏差で表した。各群間および経過時間ごとの比較にはANOVAを用い、有意差が認められた場合にはFisherのPLSDによる多重比較検定を行った。また測定項目間の相関関係の有意差検定にはPearsonの相関係数検定法を用いた。いずれも有意水準は5%未満とした。

### Ⅲ 結果および考察

図-2に安静開始時を0としたときの体温の変化量を示した。D群では運動中の体温はほぼ一定に推移していた。このことからD群では十分な水分摂取により体熱が冷却されていたことがうかがえ、またHct(表-1)にも有意な変化が認められていないことから、水分摂取によって血漿量が維持されていたと考えられる。一方、N-D群では運動開始10分(通し時間30分)から徐々に上昇し、

運動開始25分(通し時間45分)から運動終了10分(通し時間90分)にかけてはD群よりも有意に高い値を示した(図-2)。長時間運動によって発汗がおり体液量が減少すると、心拍出量が減少する。その際、循環血液量を維持するために体温調節反応が抑制され、その結果として体温が上昇することが知られている<sup>5)</sup>。つまり、皮膚血流量の増加と発汗量を抑え、循環血液量を維持する機能が働く。本研究においても体温調節反応抑制の結果としてD群とN-D群で体重あたりの発汗量に有意な差が認められなかったと考えられ(表-1)、それによりN-D群では体温が上昇し続けたものと考えられる。また心拍出量の減少を補うために心拍数が増加する<sup>14)</sup>。図-3に示すように、本研究でも安静開始時を0としたときの心拍数の変化量は、有意な差は認められなかったもののN-D群はD群よりも運動時および運動終了後において高い値となっており、N-D群では心拍出量の減少を心拍数の増加により補っていたことが推察される。

N-D群における循環血液量維持のメカニズムを血液成分および血液流動性の測定値の変化(表-1)からさらに詳細に検討すると、まず血清総タンパク質に有意な変化が認められたこと(安静時～運動終了後; $p<0.01$ 、運動終了後～運動終了20分後; $p<0.01$ )から、血漿膠質浸透圧により間質か

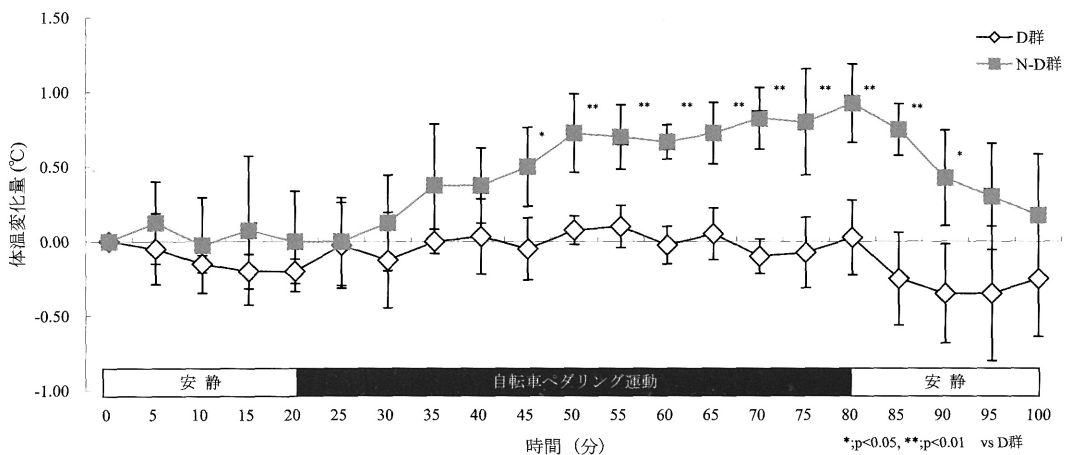


図-2 体温の変化量

表-1 D群、N-D群における測定値の変化

		安静時	運動終了後	運動終了20分後
体重あたり発汗量 (g/kg)	D群	—	11.56±1.53	12.77±1.56
	N-D群	—	11.87±0.64	12.76±1.33
全血通過時間 (秒)	D群	35.46±2.31	38.26±2.87	37.00±3.33
	N-D群	34.12±2.38	38.91±3.76	40.86±13.25
Hct (%)	D群	45.4±1.6	46.9±1.3	44.4±2.2
	N-D群	44.9±0.5	47.4±1.0 **	44.9±1.0 ##
血清総タンパク質 (g/dℓ)	D群	7.03±0.22	7.58±0.30 *	7.13±0.32
	N-D群	7.38±0.29	7.90±0.22 **	7.35±0.13
血清浸透圧 (mOsm/ℓ)	D群	293.3±3.6	249.3±4.3	290.8±4.0
	N-D群	295.5±3.3	300.5±4.7	294.5±1.3
血漿バソプレシン (pg/mℓ)	D群	6.75±4.95	8.61±5.91	5.60±3.77
	N-D群	10.69±1.09	21.35±11.55	10.62±2.73
血中乳酸濃度 (mg/dℓ)	D群	9.1±1.3	18.4±8.8	11.0±5.8
	N-D群	9.4±1.7	18.1±3.4 **	10.3±2.7 ##
Na <sup>+</sup> (mEq/ℓ)	D群	140.8±1.7	140.5±1.3	138.8±2.2
	N-D群	140.3±2.1	142.0±2.3	140.8±2.5

Values are Mean±SD., \*;p<0.05, \*\*;p<0.01 vs 安静時  
##;p<0.01 vs 運動終了後

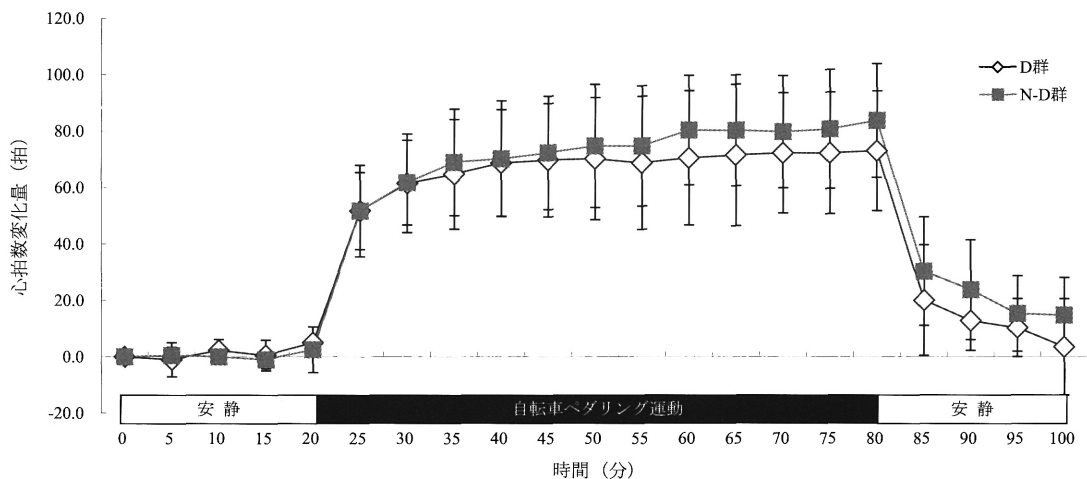


図-3 心拍数の変化量

ら脈管内への水分の移動が起こったと考えられる<sup>4)</sup>。また運動終了後の血清浸透圧は $300.5 \pm 4.7 \text{ mOsm/l}$ までに高まっていた。これはバソプレシン分泌の閾値とされる $295 \text{ mOsm/l}$ を超えており<sup>7)</sup>、有意な変化ではなかったものの血漿バソプレシンが運動終了後に高値を示したことからも（安静時～運動終了後； $p=0.056$ ）、浸透圧調節系が働いたと考えられる。したがって血漿膠質浸透圧の働き、およびバソプレシン分泌により、運動終了20分後の血清浸透圧が回復したものと考えられる（表-1）。さらに、血漿 $\text{Na}^+$ 濃度は運動強度が $50\% \dot{V}\text{O}_2\text{max}$ 以上で急激に増加し、血中乳酸濃度に比例して上昇することが知られている<sup>7)</sup>。 $\text{Na}^+$ の上昇は、活動筋以外の体細胞の細胞内液から、水分を脈管内へと引き出す駆動力となる（容量調節系）<sup>8)</sup>。本研究においてはN-D群のみ血中乳酸濃度と $\text{Na}^+$ に有意な正の相関が認められ（ $r=0.748$ ,  $p<0.05$ ；図-4）、また図-5に示すように $\text{Na}^+$ の変化率は運動終了後においてN-D群がD群よりも有意に高値を示した（ $p<0.05$ ）。これらのことからN-D群では $\text{Na}^+$ の機能によって運動終了20分後のHctが回復したと考えられる。Hctは全血通過時間と相関を示すこと

が先行研究<sup>9)</sup>により明らかにされていることから、D群とN-D群において全血通過時間に有意な差が認められなかったことは、 $\text{Na}^+$ の機能によってHctが回復されたためであると推察される（表-1）。しかし、血清総タンパク質、血漿バソプレシン、 $\text{Na}^+$ といった運動時の体液調節にかかわる血液成分や血清浸透圧が全血通過時間に影響を与えることが予想されたものの、いずれも全血通過時間とは有意な相関を示さなかった。木村ら<sup>9)</sup>は、純粋な脱水のみでは血液の通過時間は影響されないとし、加えて一過性の運動による血液の通過時間の延長は発汗による脱水の影響に加えて運動が影響を及ぼすことが明らかになったが、その具体的な因子については不明であると述べている。本研究でも運動時の水分摂取の有無による全血通過時間への影響と、その具体的な影響因子について特定するには至らなかった。

以上のようにN-D群では、心拍数の増加、血漿膠質浸透圧とバソプレシン分泌による浸透圧の維持、および $\text{Na}^+$ の機能による血漿量の回復によって循環血液量が維持され、その結果、全血通過時間はD群と有意な差が認められなかったと考えら

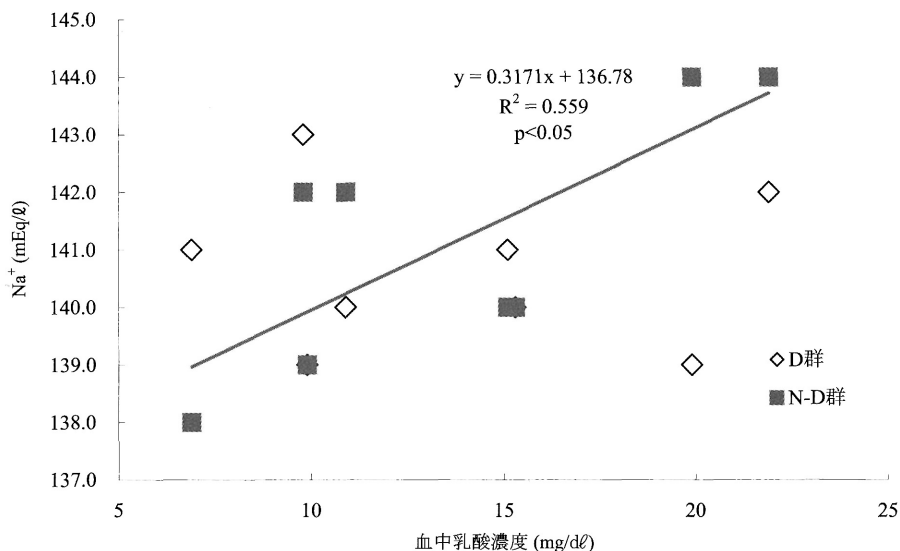
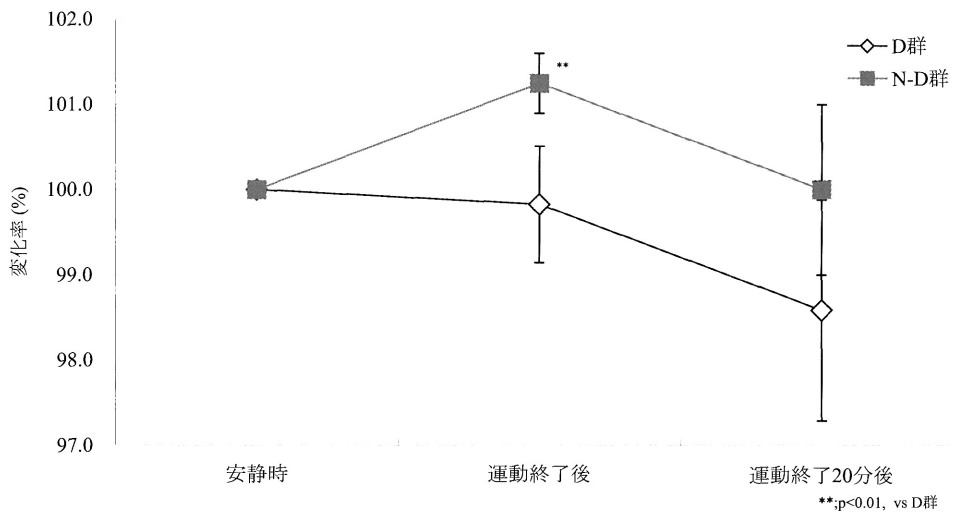


図-4 血中乳酸濃度と $\text{Na}^+$ の相関

図-5  $\text{Na}^+$ の変化率

れた。しかし、循環血液量維持の目的に対する体温調節反応抑制の結果として、体温は上昇しつづけることが明らかとなった。鷹股は<sup>13)</sup>、運動時に水分摂取を必要とする理由として、一つには静脈還流量の低下を防ぎ、体温調節機能および循環調節機能の維持をすること、二つ目には発汗に伴う血漿浸透圧の上昇による体温調節反応の抑制を防ぎ、体温を維持することであると述べている。本研究のD群においても、十分な水分の摂取により血清浸透圧の上昇が抑えられ、体温はほぼ一定に維持されており、それに対してN-D群では血清浸透圧が上昇して体温調節反応が抑制され、運動開始とともに体温が上昇し続けていたことから、運動時の体温調節に対する水分摂取の有効性がうかがえた。しかし、運動時の水分摂取による体液調節系と血液流動性との関連性や、血液流動性に及ぼす影響因子を明確にするには至らなかったことから、引き続き今後の検討課題としたい。

#### Ⅳ ま と め

本研究は運動時の水分摂取の有無が体液、特に血漿の成分や量および血液流動性の変化に及ぼす

影響と、その結果として体温調節にもたらされる変化について検討することを目的とした。水分摂取群では十分な水分摂取により運動中および運動後の体温がほぼ一定に保たれ、また血漿量も維持されていた。一方、非水分摂取群では心拍数の増加に加えて、血漿膠質浸透圧の働きとバソプレシン分泌により血清浸透圧が調節され、また $\text{Na}^+$ の機能による血漿量改善によって循環血液量を維持するように働いたが、体温調節反応の抑制を防ぐには至らず、結果として体温は運動開始時から上昇し続け、運動開始25分から運動終了10分後にかけては水分摂取群よりも有意に高い値を示した。これらのことから、先行研究と同様に運動時の水分摂取は体液量の維持と体熱の冷却に効果をもたらすことが明らかとなったものの、運動時の水分摂取の有無による体液調節が血液流動性に及ぼす影響や、その具体的な影響因子について明確にするには至らなかったため、引き続き検討する必要があると考えられた。

本研究は国土館大学体育学部附属体育研究所の平成16年度研究助成を受けて行われた。

## 引用・参考文献

- 1) Kikuchi, Y., et al., Modified cell-flow microchannels in a single-crystal silicon substrate and flow behavior of blood cells. *Microvasc. Res.* **47**:126-139, 1994
- 2) 木村達志ほか, 4週間の歩行運動トレーニングが血液流動性に及ぼす影響について. *日本ヘモレオロジー学会誌***6**:23-27, 2003
- 3) 木村達志ほか, 運動が血液の小孔通過時間に及ぼす影響について—運動特性と水分摂取を中心に—. *体力科学***46**:453-460, 1997
- 4) Lundvall J. et al., Fluid transfer between blood and tissues during exercise. *Acta. Physi-ol. Res.* **85**:258-269, 1972
- 5) Nadel E.R. et al., Effect of hydration state on circulatory and thermal regulations. *J. Appl. Physiol.* **49**:715-721, 1980
- 6) 日本体育協会, スポーツ活動中の熱中症予防ガイドブック, 1999
- 7) Nose H. et al., Water and electrolyte balance in the vascular space during graded exercise in humans. *J. Appl. Physiol.* **70**:2757-2762, 1991
- 8) 能勢博ほか, 運動時の体液調節. *臨床スポーツ医学* **14**:721-727, 1997
- 9) 岡崎和伸ほか, 持久性運動トレーニングの全血流動性に及ぼす影響. *ヘモレオロジー研究会誌***1**:59-63, 1998
- 10) 岡崎和伸ほか, 持久性運動トレーニングによるMC-FAN全血通過時間の短縮について. *日本ヘモレオロジー学会誌***6**:7-12, 2003
- 11) 佐藤靖丈ほか, 運動時の飲水が発汗反応及び体温冷却に及ぼす影響. *体力科学***46**:113-122, 1997
- 12) Stitt, J.T., Central Regulation of Body Temperature, *Exerc. Sci. and Sports Med.* **6**:1-47, 1993
- 13) 鷹股亮, スポーツと水分摂取. *保健の科学***42**:332-339, 2000
- 14) 鷹股亮ほか, 運動・スポーツにおける体温調節と水分摂取. *臨床スポーツ医学臨時増刊号***13**:68-73, 1996
- 15) 高取直志ほか, 水分摂取間隔の違いが暑熱下運動中の体温調節反応に与える影響. *体力科学***51**:317-324, 2002
- 16) 和久貴洋ほか, 高温環境下における運動時の血行動態—水分摂取の影響—. *体力科学***41**:692, 1992
- 17) Werner, J., Temperature regulation during exercise: An overview, *Exerc. Sci. and Sports Med.* **6**:49-84, 1993
- 18) Wood S.C. et al., Effects of endurance training and long distance running on blood viscosity. *Med. Sci. Sports Exerc.* **23**:1265-1269, 1991